

ỨNG DỤNG PHƯƠNG TRÌNH TRẠNG THÁI TRONG CHÍNH XÁC HÓA PHÂN BỐ ĐẶC TÍNH CHẤT LƯU CHO VĨA DẦU CÓ ĐỘNG THÁI LƯU BIẾN PHỨC TẠP

Nguyễn Hoàng Đức, Trần Quốc Việt, Nguyễn Hải An, Phùng Văn Hải

Tổng công ty Thăm dò Khai thác Dầu khí (PVEP)

Email: annh1@pvep.com.vn

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.04-02>

Tóm tắt

Đối với các mỏ dầu có động thái chất lưu biến đổi phức tạp, để mô hình hóa chính xác đặc tính dầu khí theo điều kiện áp suất - thể tích - nhiệt độ (PVT) thường phải chia ra rất nhiều phân vùng, tiến hành thu thập và phân tích thêm nhiều mẫu chất lưu (trong thực tế, tại mỗi vùng thủy động lực phải có ít nhất một giếng khai thác được thu thập mẫu) mà kết quả vẫn chưa hoàn toàn chính xác. Ngoài ra, mức độ chi tiết còn bị giới hạn bởi số vùng chia hữu hạn trong khi xét về mặt không gian thì đặc tính PVT chất lưu của vỉa có sự biến đổi liên tục.

Bài báo giới thiệu việc ứng dụng phương trình trạng thái trong điều kiện cân bằng nhiệt động học để đưa ra phương án mô hình hóa hiệu quả đặc tính chất lưu cho từng vị trí cụ thể trong không gian (biến đổi liên tục) vỉa Hamra thuộc vùng dầu khí Touggourt, sa mạc Sahara. Từ đó, có thể mô hình hóa đặc tính chất lưu biến đổi liên tục, giảm thiểu tối đa việc phải tiến hành thu thập và phân tích thêm mẫu chất lưu cũng như tiết giảm chi phí.

Từ khóa: PVT, cân bằng nhiệt động học, phương trình trạng thái, mô hình hóa chất lưu.

1. Giới thiệu

Các đặc tính của chất lưu trong vỉa chứa ảnh hưởng rất lớn đến việc thiết kế và tối ưu chiến lược khai thác/bơm ép và hệ thống thiết bị bề mặt để quản lý mỏ hiệu quả. Việc đặc tính hóa chất lưu không chính xác sẽ dẫn đến các rủi ro và sai số lớn về đánh giá cơ chế khai thác, động thái dòng chảy và chiến lược thu hồi dầu, từ đó ảnh hưởng đáng kể đến kết quả xác định giá trị thương mại của mỏ.

Từ động thái khai thác và phân tích các mẫu chất lưu ở những giếng khoan mới có thể thấy tầng chứa Hamra, thuộc vùng Touggourt, sa mạc Sahara, bị chia thành nhiều khối với điều kiện nhiệt động (áp suất và nhiệt độ) khác nhau, tính chất PVT biến đổi phức tạp: tỷ lệ khí/dầu (GOR) khác nhau ở các giếng và khu vực, áp suất bão hòa, độ nhớt thay đổi... Theo phương pháp mô hình hóa thông thường sẽ phải chia ra rất nhiều các phân vùng thủy động lực phù hợp với điều kiện nhiệt động, đồng thời cũng phải tiến hành thu thập và phân tích thêm nhiều mẫu chất lưu (trong mỗi vùng, ít nhất

phải có một giếng khai thác được lấy mẫu) mà kết quả vẫn chưa hoàn toàn chính xác. Ngoài ra, mức độ chi tiết còn bị giới hạn bởi số vùng chia hữu hạn trong khi thực tế thì đặc tính PVT chất lưu của mỏ có sự biến đổi liên tục về mặt không gian. Việc áp dụng nghiên cứu cân bằng nhiệt động học kết hợp với phương trình trạng thái đã đưa ra một phương án hiệu quả để mô hình hóa đặc tính chất lưu cho từng vị trí cụ thể trong không gian (biến đổi liên tục).

2. Phương trình trạng thái và cân bằng nhiệt động học

2.1. Phương trình trạng thái

Bất cứ phương trình nào thể hiện mối liên quan giữa trạng thái pha của hỗn hợp (hoặc chất) với áp suất (pressure - P), nhiệt độ (temperature - T) và thể tích (volume - V) đều được gọi là phương trình trạng thái (EOS) [1]. Bắt đầu từ định luật Boyle - Charles sử dụng cho khí lý tưởng biểu thị bằng công thức sau :

$$PV = nRT \quad (1)$$



Ngày nhận bài: 1/3/2021. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 1 - 24/3/2021.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 1/4/2021.

Trong đó:

P: Áp suất (psia)

V: Thể tích (ft³)

n: Số mol khí ở điều kiện áp suất P, nhiệt độ T có thể tích V (mol)

T: Nhiệt độ (°R)

R: Hằng số khí, R = 10,732 (psia.scf/lb. mol. °R).

Ban đầu, EOS (1) chỉ được áp dụng chủ yếu cho các cấu tử tinh khiết, sau đó được phát triển cho các hợp chất nhiều thành phần hơn. Khi mới áp dụng cho hỗn hợp, chúng được dùng đối với các hỗn hợp không phân cực (các EOS: Soave (1972); Peng and Robinson (1976) và các hợp chất phân cực yếu (các EOS: Huron (1978); Assenlineau (1978); Graboski và Daubert (1978)) [1]. Sau đó, phương trình trạng thái đã phát triển nhanh chóng cho việc tính toán đặc tính chất lưu PVT của các hỗn hợp cả phân cực và không phân cực.

Có nhiều điểm thuận tiện cho việc áp dụng phương trình trạng thái trong việc tính toán đặc tính chất lưu: i) dùng được với khoảng áp suất và nhiệt độ rộng, kể cả vùng áp suất cao; ii) các cấu tử có thể thay đổi bất kỳ, từ nhẹ tới nặng, từ không phân cực tới phân cực; iii) có thể dùng cho cân bằng lỏng - hơi, lỏng - lỏng; iv) có thể dùng cho cả pha hơi và pha lỏng. Ngoài ra, các phương trình trạng thái còn dùng để xác định các tính chất như tỷ trọng, áp suất hơi, enthalpy, entropy...

Phương trình Van Der Waals là phương trình trạng thái đầu tiên dự đoán sự cùng tồn tại 2 pha lỏng - hơi. Sau đó, Redlich - Kwong (1949), Soave (1972) và Peng Robinson (1976), Carhanan và Starling (1969), Guggenheim (1965) và Boublik (1981), Chen và Kreglewski (1977), Christoforakos và Franck (1986), Heilig và Franck (1989) [1] lần lượt cải tiến để tăng độ

chính xác của phương trình trạng thái trong việc dự đoán cân bằng pha, tính áp suất hơi, tỷ trọng lỏng, tỷ trọng khí, tỷ lệ các pha cân bằng...

Bảng 1. Các phương trình trạng thái EOS phổ biến trong công nghiệp dầu khí

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| Peng - Robinson (PR) (1976) | $\frac{a(T)V}{RT[V(V + b) + b(V - b)]}$ |
| Fuller (1976) | $\frac{a(T)}{RT(V + cb)}$ |
| Heyen (1980) (Sandler, 1994) | $\frac{a(T)V}{RT[V^2 + (b(T) + c)V - b(T)c]}$ |
| Schmit - Wenzel (1980) | $\frac{a(T)V}{RT(V^2 + ubV + wb^2)}$ |
| Kubic (1982) | $\frac{a(T)V}{RT(V + c)^2}$ |
| Adachi (1983) | $\frac{a(T)V}{RT[(V - b_2)(V + b_3)]}$ |
| Stryjeck - Vera (SV) (1986) | $\frac{a(T)V}{RT(V^2 + 2bV - b^2)}$ |
| Schwartzentruber - Renon (1989) | $\frac{a(T)V}{RT[(V + c)(V + 2c + b)]}$ |

Trong đó:

a, b, c: Hệ số tương quan được tính toán theo áp suất tới hạn và nhiệt độ tới hạn;

w: Hệ số lệch cầu.

2.2. Cân bằng nhiệt động học

Cân bằng nhiệt động giữa lỏng và hơi của cấu tử i được biểu thị như sau [2]:

$$f_i^V = f_i^L \tag{2}$$

Trong đó: f_i^V, f_i^L là độ bay hơi của cấu tử i trong pha hơi và pha lỏng.

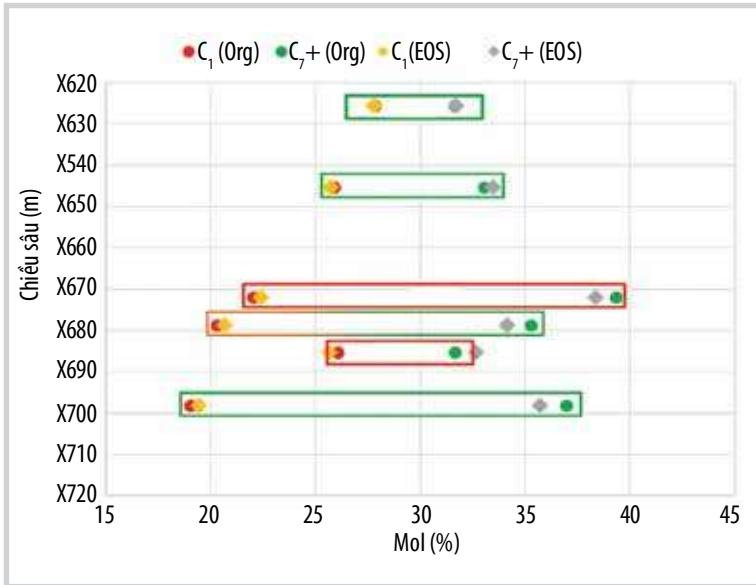
Tuy nhiên, trong thực tế, thường sử dụng phương trình sau:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \tag{3}$$

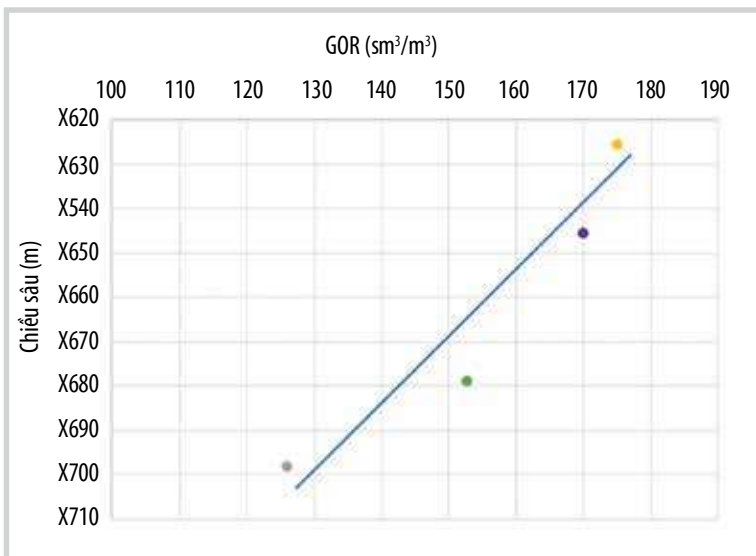
K_i được gọi là hằng số cân bằng pha lỏng - hơi của cấu tử i, bằng tỷ lệ giữa phần mol của cấu tử i trong pha hơi (y_i) và phần mol của nó trong pha lỏng (x_i). Phương trình này còn được gọi là Định luật Henry

Bảng 2. Tóm tắt các đặc tính dầu - khí từ các giếng khai thác via Hamra

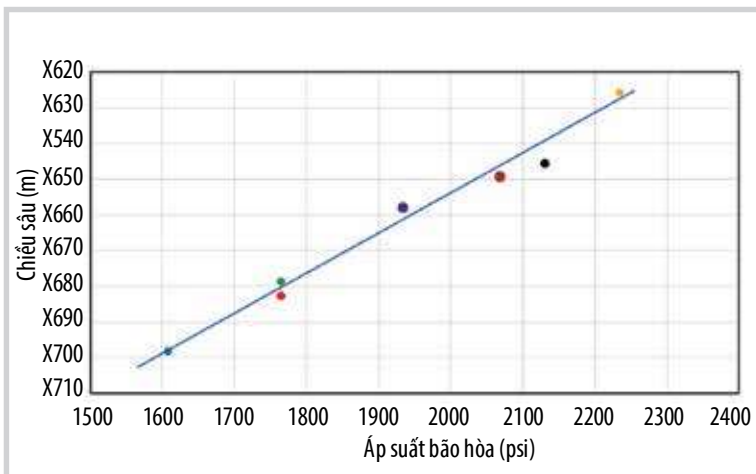
| Mẫu | A | B | C | D | E | F | G |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Chiều sâu (mTVD) | x630 | x622 | x407 | x460 | x421 | x029 | x683 |
| Tỷ số khí dầu (sm ³ /sm ³) | 174 | 126 | 175 | 170 | 178 | 180 | 124 |
| Áp suất bão hòa (psi) | 2340 | 1608 | 2234 | 2130 | 2123 | 2500 | 2021 |
| Hệ số thể tích (rm ³ /sm ³) | 1,609 | 1,610 | 1,605 | 1,631 | 1,691 | 1,397 | 1,356 |
| Tỷ trọng (API) | 42,1 | 43,8 | 42,8 | 42,9 | 42,0 | 44,1 | 44,8 |



Hình 1. Quan hệ thành phần C_1 và C_{7+} với chiều sâu.



Hình 2. Quan hệ tỷ số khí hòa tan (GOR) với chiều sâu.



Hình 3. Quan hệ áp suất bão hòa với chiều sâu.

và hằng số K được biểu thị giống như hằng số Henry.

Phụ thuộc vào từng hệ thống mà có thể sử dụng một số phương pháp xác định hằng số K. Phương pháp đo thực nghiệm được ưa chuộng nhất nhưng tốn kém và mất thời gian. Ngoài ra, một vài công cụ đồ thị (graphical tool) và phương pháp số (numerical tool) cũng được dùng để xác định hằng số K.

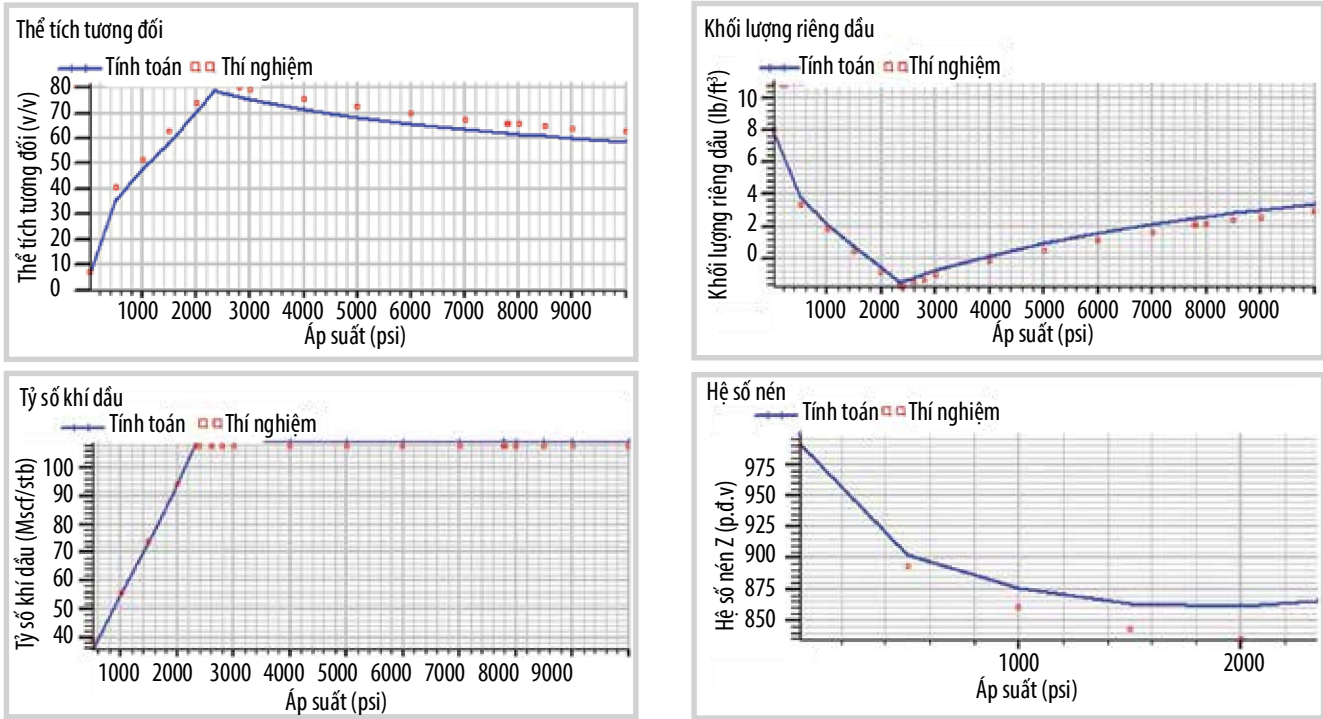
Thông thường, hằng số K là một hàm của áp suất, nhiệt độ và thành phần pha lỏng - hơi. Tùy theo các cấu tử có trong hệ thống, áp suất, nhiệt độ, thành phần và mức độ phân cực hóa mà có thể dùng các phương pháp khác nhau. Các phương pháp được dùng rộng rãi là giản đồ K (K value chart), định luật Raoult, áp dụng phương trình trạng thái (EOS). Dựa vào phương trình cân bằng nhiệt động học, từ thành phần hỗn hợp ban đầu, thành phần các cấu tử trong hỗn hợp sẽ được tính toán tùy thuộc điều kiện nhiệt độ, áp suất bất kỳ [3].

3. Áp dụng cho việc chính xác hóa phân bố đặc tính dầu khí, đối tượng Hamra thuộc vùng Touggourt, sa mạc Sahara

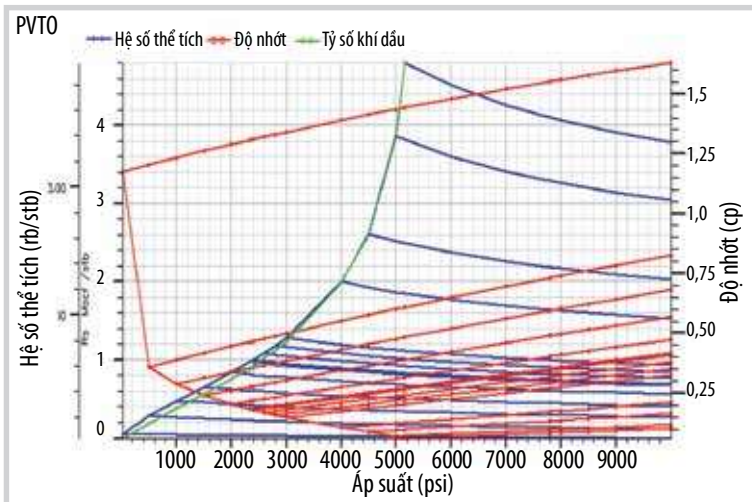
Via dầu Hamra nằm trong vùng Touggourt Algeria, thuộc sa mạc Sahara, cách thủ đô Algiers khoảng 500 km về phía Đông Nam. Từ cập nhật động thái khai thác và phân tích PVT các mẫu ở những giếng mới khoan có thể thấy via bị phân thành nhiều khối khác nhau, tính chất PVT của mỏ biến đổi phức tạp như GOR khác nhau ở các giếng, khu vực, áp suất bão hòa, độ nhớt thay đổi... (Bảng 2).

Bảng 2 cho thấy đối tượng tầng Hamra chứa dầu loại nhẹ với tỷ trọng từ 42 - 45 °API, cùng đó là tỷ số khí - dầu biến đổi từ 124 - 180 sm^3/sm^3 . Hệ số thể tích dầu thay đổi từ 1,35 - 1,69 rm^3/sm^3 . Dầu trong điều kiện vỉa ban đầu ở trạng thái chưa bão hòa với áp suất điểm bọt trong khoảng 1608 - 2500 psi. Độ nhớt thay đổi từ 0,2 - 0,5 cp.

Để giải mô hình hóa đặc tính chất lưu của mỏ, theo cách thông thường sẽ phải chia ra nhiều các phân vùng thủy lực với đặc trưng PVT riêng, như vậy trên toàn diện tích nghiên cứu phải tiến hành thu thập và phân tích thêm



Hình 4. Kết quả khớp số liệu thí nghiệm cho phương trình trạng thái EOS.



Hình 5. Họ bảng PVT của chất lưu tầng H mỏ B.

rất nhiều mẫu chất lưu (trong mỗi vùng, phải thu thập mẫu ít nhất từ một giếng khai thác) mà kết quả vẫn chưa hoàn toàn chính xác, chưa kể việc chia nhiều phân vùng sẽ gây ra các lỗi hội tụ trong quá trình chạy mô phỏng khai thác. Đồng thời, mức độ chi tiết bị giới hạn bởi số vùng chia hữu hạn trong khi thực tế xét về mặt không gian thì đặc tính PVT chất lưu của mỏ có sự biến đổi liên tục.

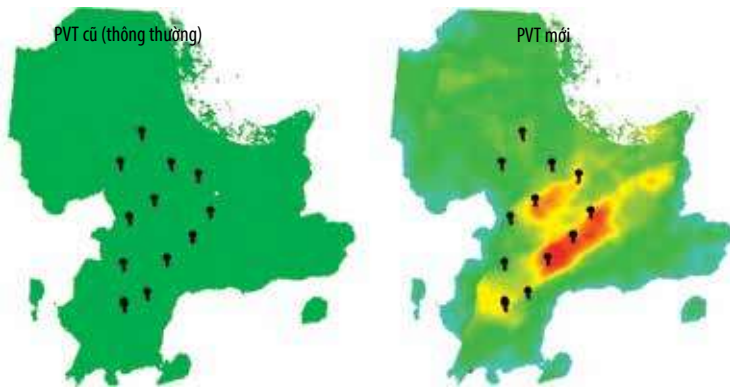
Bằng cách áp dụng tính toán cân bằng nhiệt động học kết hợp với phương trình trạng thái, bài báo đã đưa ra phương án hiệu quả cho việc đặc tính hóa chất lưu cho bất kể vị trí cụ thể trong không gian (biến đổi liên tục) cũng như giảm thiểu tối đa việc phải tiến hành thu thập và phân tích thêm mẫu chất lưu (đối với những vùng chưa được lấy mẫu). Nhất là sau thời gian dài khai thác, thành phần và tính

chất chất lưu có thể bị biến đổi dễ gây sai số lớn so với mẫu lấy từ các giếng thăm dò thăm lường.

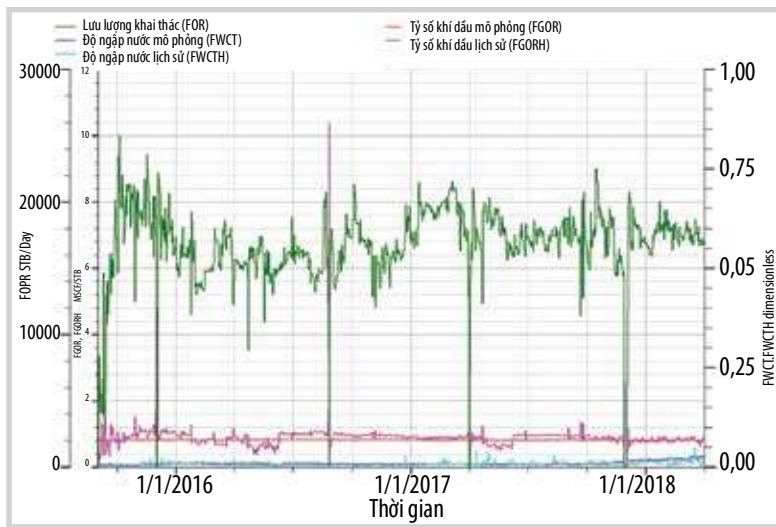
3.1. Áp dụng các quy luật cân bằng nhiệt động học để tìm ra phân bố về thành phần các cấu tử, qua đó tìm ra xu thế biến đổi các đặc tính PVT tương ứng

Mô hình phương trình trạng thái EOS được xây dựng dựa trên các nguyên lý nhiệt động học cơ bản do vậy sẽ rất hữu ích cho việc ngoại suy các giá trị vượt ra dải số liệu khảo sát, thí nghiệm. Để đảm bảo tính tin cậy, các tham số nhiệt động học trong mô hình PVT được tạo ra dựa trên việc sử dụng các phương trình trạng thái đã được hiệu chỉnh với các số liệu đo từ phòng thí nghiệm. Quá trình mô hình hóa chất lưu theo phương trình trạng thái gồm các bước quan trọng sau: tối ưu số lượng thành phần bằng cách đặc tính hóa các cấu tử C₇₊, tính toán cân bằng pha, các phương pháp giải để đảm bảo tính hội tụ, hồi quy với các số liệu thí nghiệm.

Các thành phần nặng C₇₊ chứa rất nhiều các đồng đẳng khác nhau (paraffin, napthen và chất thơm) có ảnh hưởng lớn đến việc xác định động thái pha nhiệt động học của chất



Hình 6. So sánh việc mô hình hóa đặc tính PVT chất lưu (áp suất bão hòa).



Hình 7. Kết quả phục hồi lịch sử khai thác mô hình tầng H mỏ BRS.

lưu. Chẳng hạn như ở khí condensate, áp suất ngưng tụ bị ảnh hưởng mạnh bởi hàm lượng mol của C_{7+} . Trong dầu nặng, thành phần C_{7+} ảnh hưởng lớn đến độ nhớt, thành tạo asphaltene và wax. Tương tự như vậy, trong dầu nhẹ, thể tích dầu và các tính chất khác ở áp suất thấp hơn áp suất bão hòa được xác định bởi hàm lượng các thành phần trung bình và nặng.

Dựa trên số liệu ban đầu, mặc dù đã có đến 9 mẫu chất lưu, nhưng các tham số PVT (thành phần cấu tử C_1 và C_{7+} , GOR, áp suất bão hòa...) có mối liên hệ kém do chất lượng mẫu và đo chưa đảm bảo, nhiều tạp chất gây bẩn mẫu và ảnh hưởng đến kết quả đo. Trên cơ sở lý thuyết về cân bằng nhiệt động học và phân ly trọng lực, kết hợp với phân tích đánh giá các số liệu thí nghiệm phân tích mẫu PVT từ các giếng khai thác trong vùng nghiên cứu, nhóm tác giả đã loại bỏ được các yếu tố ảnh hưởng, đồng thời tìm ra quy luật về phân bố của những đặc tính PVT quan trọng nhất cũng như phương trình trạng thái EOS để mô phỏng động thái pha [1]. Kết quả cho thấy các tính chất quan trọng như hàm lượng thành phần các cấu tử, áp suất bão hòa, tỷ số khí hòa tan... có quan hệ với độ sâu vỉa (Hình 1 - 3). Kết quả mô phỏng phương trình EOS với số liệu phân tích thí nghiệm cho các thông số chính được trình bày ở Hình 4.

3.2. Áp dụng quy luật vào mô hình khai thác, qua đó ứng với mỗi chiều sâu khác nhau sẽ có đặc tính PVT khác nhau, mỗi ô lưới trong mô hình mô phỏng cũng sẽ có một bảng PVT

Trên cơ sở các cấu tử (từ $C_1 - C_{7+}$; N_2 , CO_2) và các thông số tính chất PVT quan trọng có quan hệ với chiều sâu cùng với phương trình trạng thái EOS “Peng-Robinson” - có độ liên kết tốt nhất (đối với bộ số liệu của vỉa Hamra), nhóm tác giả đã thực hiện mô hình hóa đặc tính dầu khí điều kiện vỉa bởi hệ thống bảng PVT (Hình 5) để đưa vào sử dụng trong mô hình mô phỏng khai thác vỉa Hamra. Trên cơ sở họ bảng này, ứng với từng vị trí cụ thể của mỏ (một ô lưới trong mô hình khai thác), phần mềm mô phỏng sẽ tạo ra bảng PVT riêng cho ô lưới đó dựa vào chiều sâu.

Việc áp dụng giải pháp EOS đã tạo ra vô số bảng PVT và luôn đảm bảo mỗi ô lưới trong mô hình mô phỏng sẽ có bảng PVT riêng, không bị hạn chế bởi cách chia số vùng hữu hạn. So sánh với cách áp dụng phương pháp mô hình hóa PVT trước đó (theo cách thông thường, Hình 6), có thể thấy đặc tính PVT của chất lưu, chẳng hạn như áp suất bão hòa, được mô phỏng biến đổi liên tục theo không gian thay vì việc đồng nhất và trung bình hóa cho cả mô hình. Giải pháp này vừa tiết giảm được số lượng mẫu cần thu thập và phân tích, vừa chi tiết hóa được đặc tính PVT của mỏ. Kết quả cũng giúp được việc phục hồi số liệu lịch sử cho tham số GOR cũng như đảm bảo cân bằng vật chất của mô hình khai thác đạt kết quả tốt hơn so với phương pháp trước đây (Hình 7).

4. Kết luận

Việc ứng dụng phương trình trạng thái trong điều kiện cân bằng nhiệt động học giúp tiết giảm số lượng mẫu cần thu thập và phân tích, chi tiết và chính xác hóa được đặc tính PVT của các khu vực quanh các giếng khai thác hiện nay của mỏ, đồng thời là cơ sở để tối ưu việc lấy mẫu và lựa chọn các chỉ tiêu phân tích cho các giếng ở giai đoạn tiếp theo. Mỗi một ô lưới khác nhau sẽ có bảng PVT riêng (không bị hạn chế bởi cách chia số

vùng hữu hạn). Phương pháp này giúp kết quả phục hồi số liệu lịch sử khai thác của mô hình tốt hơn, từ đó tăng tính tin cậy của mô hình dự báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Tarek Ahmed, *Equation of state and PVT analysis: Application for improved reservoir modeling*. Gulf Publishing Company, 2007.

[2] Curtis H. Whitson and Michael R. Brule, *Phase behavior*. SPE Monograph Series, 2000.

[3] Hanafy Hussein and Ismail Shaban Mahgoub, "Methodology of investigation the compositional gradient within the hydrocarbon column", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2005*. DOI: 10.2118/95760-MS.

USING EQUATION OF STATE (EOS) TO ENHANCE CHARACTERISATION OF PETROLEUM RESERVOIR FLUIDS WITH COMPLEX BEHAVIOURS

Nguyen Hoang Duc, Tran Quoc Viet, Nguyen Hai An, Phung Van Hai

Petrovietnam Exploration Production corporation

Email: annh1@pvep.com.vn

Summary

For oil fields with complex fluid dynamics, to accurately simulate the oil and gas properties under pressure-volume-temperature (PVT) conditions it is often necessary to compartmentalise into sub-regions, collect and analyse many more fluid samples (in fact, in each hydrodynamic zone there must be at least one well to be sampled). However, the results are still not entirely correct. In addition, the level of detail is limited by a finite number of sub-regions while spatially, the fluid PVT properties of the reservoir change continuously.

The paper presents the application of EOS in thermodynamic equilibrium in order to provide an effective method for modelling the fluid properties for each specific location in space (continuous variation) from Hamra reservoir in Touggourt, Sahara desert. Thus, it is possible to simulate the continuously variable fluid properties, minimise the need to carry out the collection and analysis of additional fluid samples and reduce costs.

Key words: PVT, thermodynamic equilibrium, Equation of State, reservoir fluid simulation.